第６章　うね自動追従システムの制御精度の評価

6.1　緒言

前章までにトラクタ用作業機のうね自動追従システムを構成するレーザ式作物列センサと油圧制御機構および計測制御ソフトウェアの概要について述べた。本章では，室内実験と圃場実験を行い，開発したうね自動追従システムの制御特性と制御精度を明らかにすることを目的とした。

室内実験では，うね自動追従システムの基本的な制御特性を明らかにするためにステップ応答特性と周波数応答特性試験を行う。また圃場実験では，実際にトラクタの 3 点リンクヒッチに作業機モデルを装着し，それに開発した作物列センサを取付け，制御目標のラインマーカ跡と作物列について追従システムの制御精度を評価する。

6.2　実験装置および方法

6.2.1　実験装置

図 6.1 は室内および圃場実験で供試したトラクタ（クボタ，ZL1-33）と作業機モデルおよび搭載したコンピュータと追従システムの様子を示す。図のように，油圧スライド装置をトラクタの 3 点リンクヒッチのロワーリンクに取り付け，作物列センサを自作の作業機モデルのフレームに設置した。センサの位置は，ラインマーカ跡を計測する場合は作業機モデルのフレーム中心とし，作物列を計測する場合はそのフレームの中心から 300 mm（うね間 600 mm の場合）左側に取付け，センサが作物の真上を通過するように取付けた。また，圃場実験ではコンピュータや各種センサ, 制御機器の電源として交流 100 V－900 W の発電機（ヤマハ，EF900iS）を用いたが，実際のトラクタ作業では DC12 V 用のインバータを利用することも可能である。
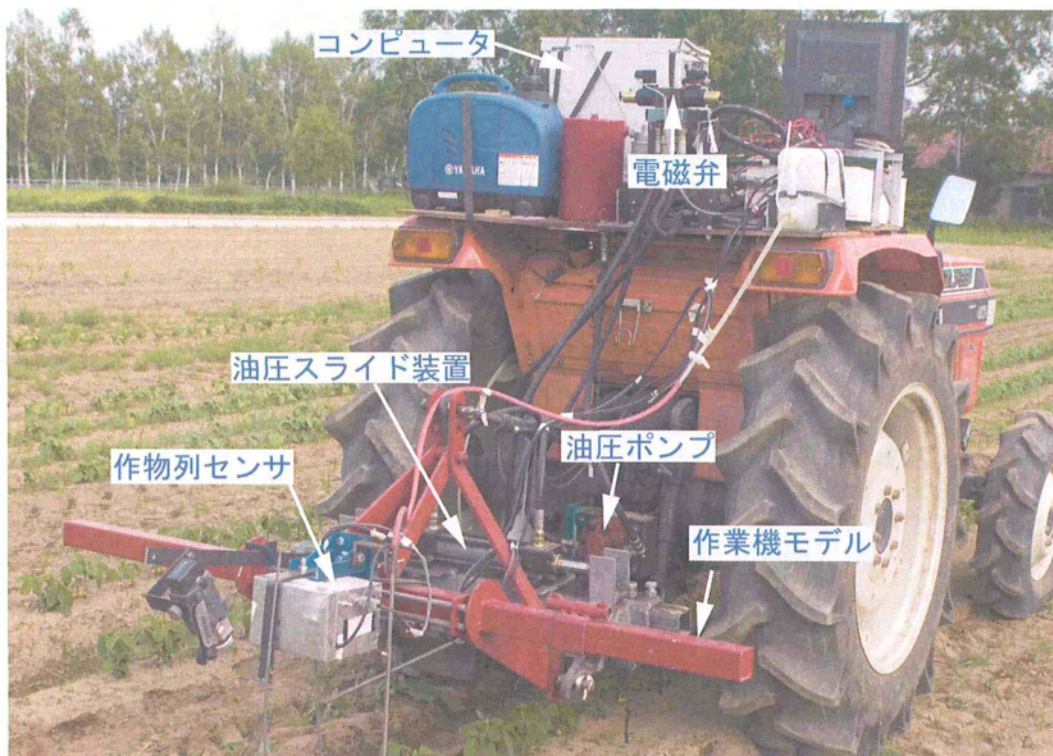
図 6.1　供試トラクタとうね自動追従システムの様子

6.2.2　実験方法

6.2.2.1　室内実験方法

室内実験では，開発したうね自動追従システムのステップ応答と周波数応答特性について実験を行った。

ステップ応答特性とは，制御目標を瞬時に動かし，この目標に追従し，整定するまでの所要時間を評価するものである。本システムの制御プログラムは，前章で述べたように，作物列センサが出力するミラーごとの位置計測データを移動平均で平滑化処理し，制御を安定させるために設けた不感帯を変えることによって制御特性が変化する。そこで，計測データの移動平均を 1，3，5 個の 3 段階に設定し，不感帯を 10，15，20，25 mm の 4 段階に設定して形状が明確な V 字モデルを供試してステップ応答試験を行った。追従システムにステップ変化を与える方法は図 6.2 に示すように，まず a の V 字モデルをセンサの真下

に設置し，その上にスライド板をかぶせ，A 窓でセンサからのレーザビームが a の V 字モデルを計測できる状態にしてシステムを安定させる。つぎに，スライド板を瞬時に矢印の方向に移動させ，a の V 字モデルを覆い隠すと同時に B 窓で b の V 字モデルを現れるようにして瞬時的なステップ変化を与えた。このときのステップ距離は 60，100，140 mm の 3 段階に変化させ，実験を行った。
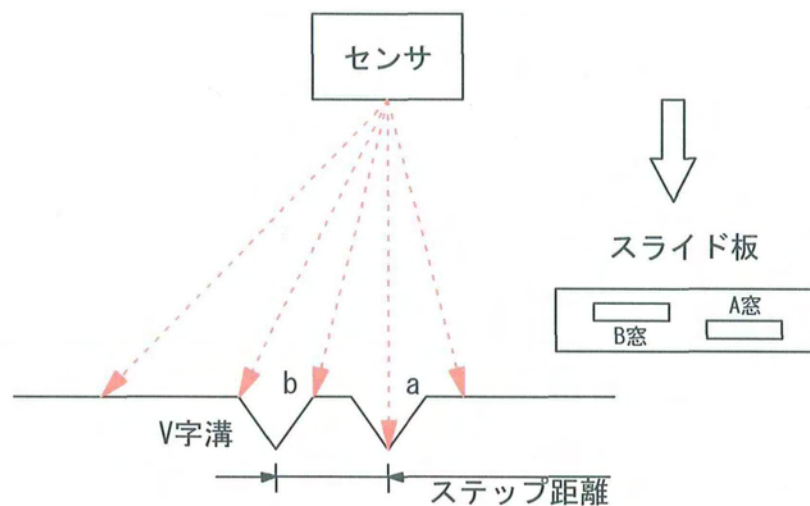
図 6. 2　ステップ応答性の測定方法

なお，追従システムの追従軌跡はレーザ距離センサ（松下電工，LM100）で計測し，メモリレコーダ（日本電気三栄，8M37）で記録して求めた。

周波数応答特性は圃場で作物列がトラクタの進行方向に対して左右に蛇行している状態を想定したものである。実験は図 6.3 に示すように第 4 章で利用した圃場模擬走行試験装置の上に厚紙で作製した V 字モデルを設置し，クランク機構によって，左右の全振幅を 150 mm，周波数を 0.025～0.33 Hz の範囲で 11 段階に変化させて V 字モデルの左右の動きに対して油圧スライド装置によって作業機モデル全体を追従させた。表 6.1 は周波数応答試験の設定実験パターンを示すが，合計 22 回の実験を行った。なお，制御目標の V 字モデルの左右の

移動軌跡と作業機モデルの追従軌跡はレーザ距離センサで計測し，A/D 変換カードを介してその距離データをノート型パソコンに取り込み，両者の関係から周波数応答特性を評価した。
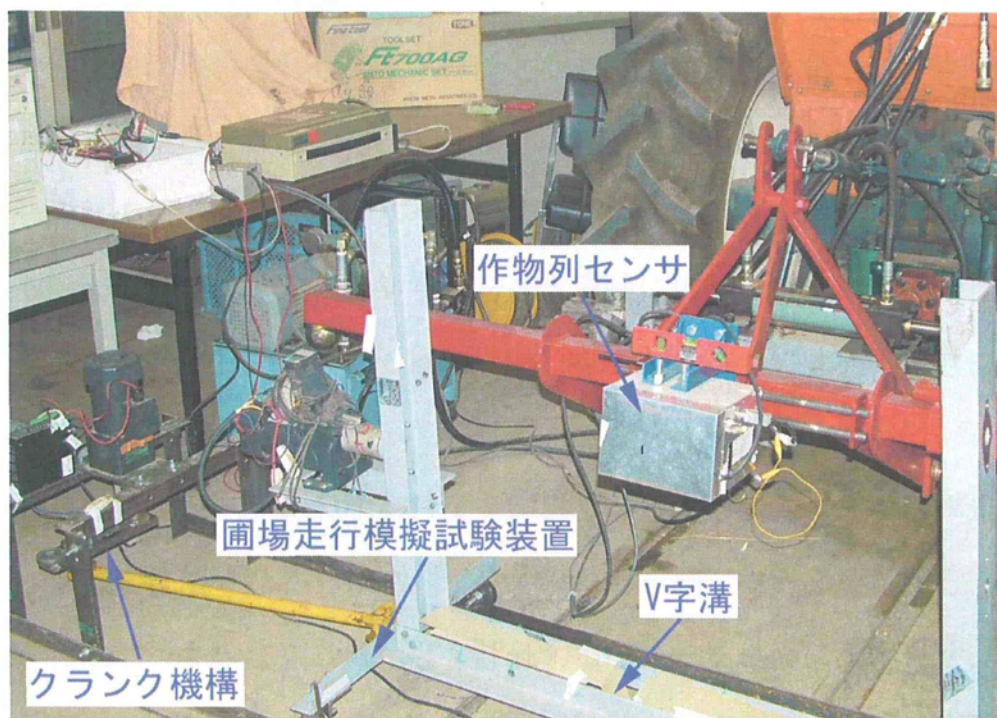
図 6.3　周波数応答特性の実験風景

表 6.1　周波数の設定パターン

不感帯 [mm]	回転速度 [rpm]	周波数 [Hz]
±10 ±20	1.50	0.025
	2.00	0.033
	2.40	0.040
	3.00	0.050
	3.80	0.060
	5.00	0.080
	6.00	0.100
	10.0	0.170
	12.0	0.200
	15.0	0.250
	20.0	0.330

6.2.2.2　圃場実験方法

圃場実験では，播種・移植作業と中耕除草作業を想定したうね自動追従システムのうね合わせの制御精度について評価した。

制御目標は，播種・移植作業の場合では往復作業時に土壌表面に描かれるラインマーカ跡がうね合わせの水平位置となり，中耕除草作業では作物列がうね合わせの目標位置となる。そこで，本学の精密実験圃場において，前者のラインマーカ跡の場合は，ロータリハローで砕土整地後，土壌表面に第 4 章と同様に幅 60 mm，深さ 70 mm の V 字溝を描き実験に供試し，また後者の作物列の場合は大豆を栽培し，草高約 60mm，葉の幅約 100 mm の状態のときに実験を実施した。

うね自動追従システムの制御精度を圃場で評価する場合，トラクタ走行の軌跡と作業機の位置すなわち作物列センサの軌跡を測定する必要がある。第 4 章では，作物センサの位置計測精度を評価する際，水を地面に滴下させ，トラクタの前部に取り付けた作物列センサの通過軌跡を測定した。今回の実験でも，同様の方法で予備実験を行ったが，自動追従システムの制御動作によって作業機モデルが頻繁に左右に動き，落下する水滴が乱れて正確に作業機モデルに取り付けたセンサの通過軌跡を求めることができなかった。そこで，図 6.4 に示すように，トラクタ側にその中心位置を示すマーカと作業機モデル側に取り付けた作物列センサの中心位置を示すマーカをそれぞれ取り付け，そのマーカを制御目標のラインマーカ跡や作物の直上まで下ろし，ビデオカメラでその位置関係を撮影した。まず，ビデオ動画をパソコンに取り込み，進行距離 0.2 m 間隔[67]に静止画を取得し，コンピュータディスプレイ上で定規ツールを利用してそれぞれのマーカや制御目標の位置を測定した。つぎに，その位置関係からトラクタの進行方向に対するトラクタ中心の水平位置と作物列センサすなわち作業機モデルの追従軌跡を求めた。作業機モデルに取り付けたセンサの設定高さ

は土壌表面から 400 mm であり，トラクタの作業速度は 0.5，1.0，1.5 m/s の 3 条件で行い，制御目標の作物列やラインマーカ跡に沿って約 20 m 走行させた。
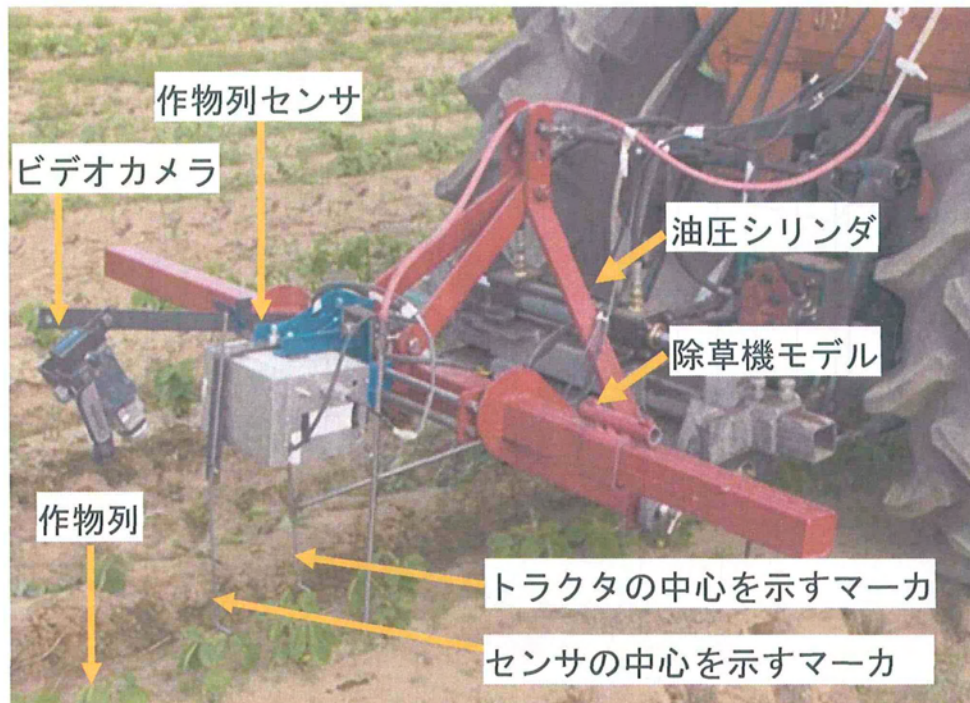
図 6.4　圃場での追従システムの制御特性の測定方法

6.3　実験結果および考察

6.3.1　室内実験での制御結果の評価

6.3.1.1　追従システムのステップ応答特性

うね自動追従システムのステップ応答特性を求める前に，制御システムの応答性や安定性に影響を及ぼす不感帯と移動平均個数を任意に変化させてその制御特性を検討した。図 6.5 は計測データの移動平均個数と制御目標との不感帯とステップ応答時の関係を示す。x 軸の「1 の 10」や「5 の 10」の項目名の前の数値の 1 や 5 は移動平均個数を表し，後ろの 10 が設定した不感帯を表す。y

軸はステップ応答の質を評価するむだ時間や整定時間および制御誤差を示す。いずれも小さい数値であれば，応答性が速く，かつ制御の安定性が高いことを意味する。
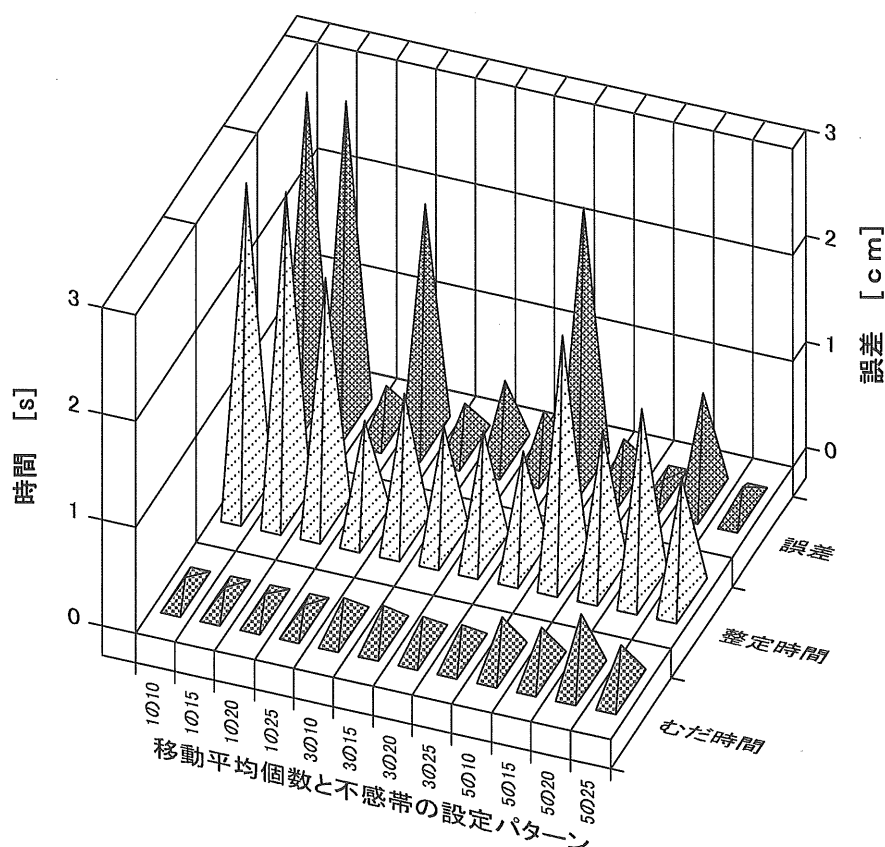
図 6.5　移動平均個数と不感帯に違いによるとステップ応答特性

全体的に見ると，移動平均個数を 3 個にした場合，整定時間や誤差が少なくなることから，制御上設定したパラメータが適当であると思われ，その中で，特に移動平均個数が 3 個で，かつ不感帯が 10 mm の条件が最もステップ応答の制御特性が向上することを確認した。そこで，これ以降の追従制御の実験では，この移動平均個数と不感帯を基本として実験を行った。なお，むだ時間とは制御電圧が出力されてから制御対象が動作し始まるまでの時間であり，また整定時間は制御対象が動作し，その制御目標に達し，再び制御対象が静止するまでの時間で表す。さらに，誤差は制御目標が静止したときの制御目標との偏差を

意味する。

図 6.6 はステップ応答試験のシステムの追従軌跡の結果を示す。作物列センサは瞬間的にステップ状に変化したV字モデルの制御目標の位置を検出し，コンピュータが電磁弁に制御信号を出力するまでに 0.22 s を要したことを示している。その後，電磁弁の作動によって油圧シリンダが動作し，ロッドが動くまでに 0.07 s を要した。制御信号の出力が遅れた理由は，本研究で開発した作物列センサは 6 面体ポリゴンミラーを 140 rpm で回転させて位置計測を行うことから 1 枚のミラーの走査時間が 0.07 s となり，その時間間隔で一個の作物列の位置データが取得される。そこで，今回供試作成した制御プログラムでは，制御の安定性を図るため，前述のように求められた作物列の個々の位置を順次 3 個加算して平均値を連続的に求める移動平均法を採用していることから，瞬間的に計測位置が変化しても，そのデータを平滑化処理するために，このような時間遅れが生じることに起因する。
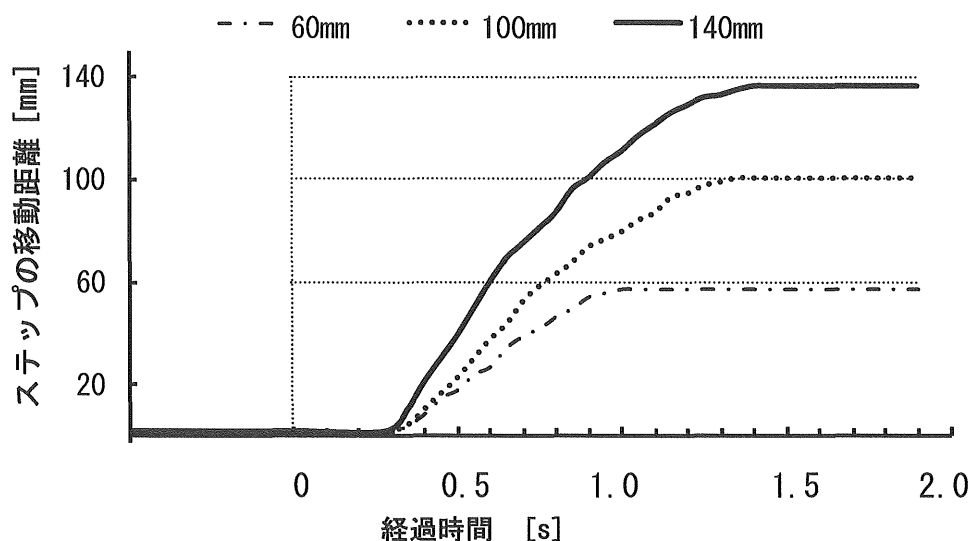
図 6.6　ステップ応答の移動距離と追従軌跡の関係

また，油圧シリンダのロッドが動作するまでの所要時間が 0.07 s であった理由は，油圧配管の伸び縮みの他，電磁弁のスプールの移動に要する時間が主な原因と考えられる。

つぎに, 図のように追従軌跡の勾配はステップ距離が大きいほど大きくなり，追従速度が速くなることを意味する。これは，本システムの場合，PID 制御の比例要素の部分を採用し，制御対象が制御目標との偏差すなわち制御誤差が大きいほど電磁弁に出力する制御電圧を高くし，油圧シリンダの移動速度を高めるようにしたためである。なお，その詳細を表 6.2 に示す。

表 6.2　ステップ距離とシリンダ移動速度の関係

ステップ距離[mm]	60	100	140
整定時間[s]	1.0	1.4	1.4
シリンダの移動速度[mm/s]	60	74	100

6.3.1.2　追従システムの周波数応答特性

圃場模擬走行試験装置のクランク機構を利用して，周波数を 0.025 Hz から 0.33 Hz までの 11 段階に変化させ，制御目標の V 字モデルを正弦波状に変化させてうね自動追従システムの周波数応答特性を評価した。図 6.7 から図 6.17 は不感帯が±10 mm の場合であり，図 6.18 から図 6.28 は不感帯±20 mm の場合の結果をそれぞれ示す。各図の横軸は経過時間であり，縦軸は制御目標と追従システムの応答軌跡の振幅の水平距離を示す。

まず，周波数を 0.025～0.1 Hz（不感帯±10 mm が図 6.7 から図 6.13，不感帯±20 mm が図 6.18 から図 6.24）に設定した場合，本追従システムの制御の安定を図るために，不感帯を設定したことから，V 字モデルの位置が正弦波状に左右に変化したのに対し，本システムの応答軌跡は階段状に動作して追従している。これは，作物列センサが V 字モデルの真上を通過するように常に油圧スラ
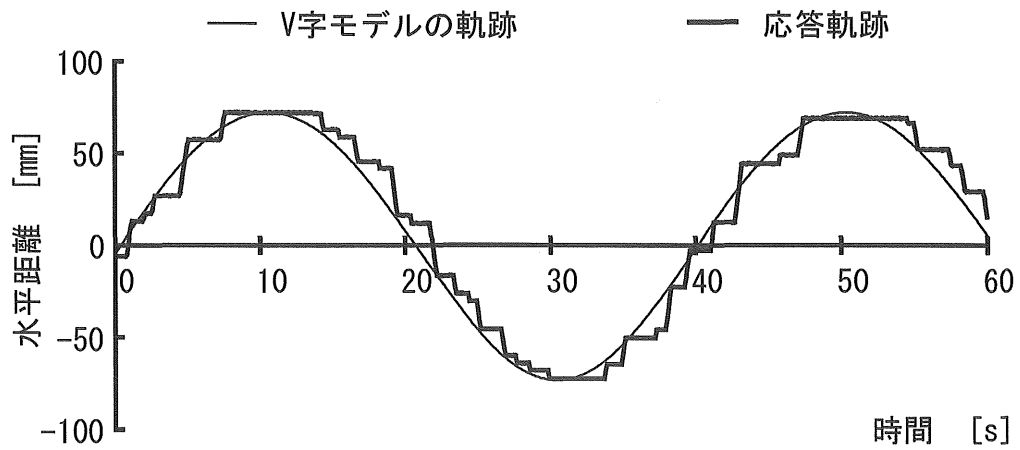
図 6.7 周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.025 Hz）
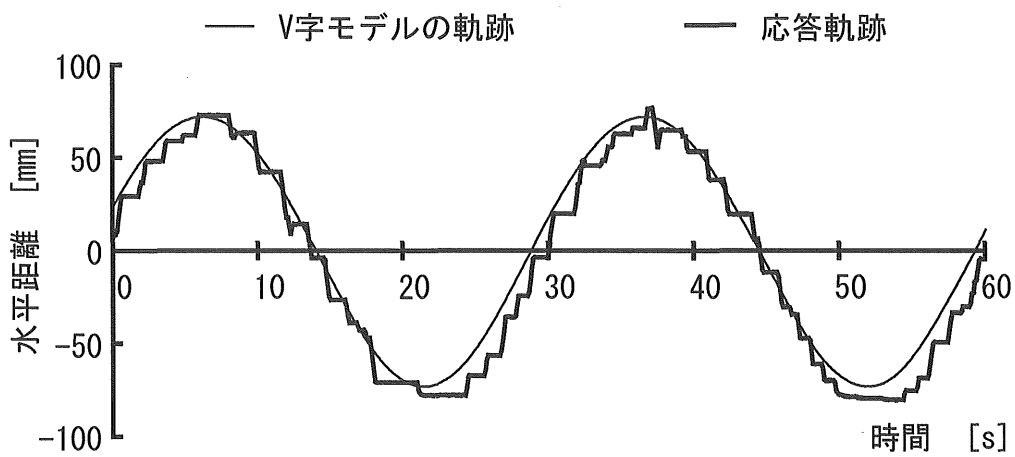
図 6.8 周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.033 Hz）
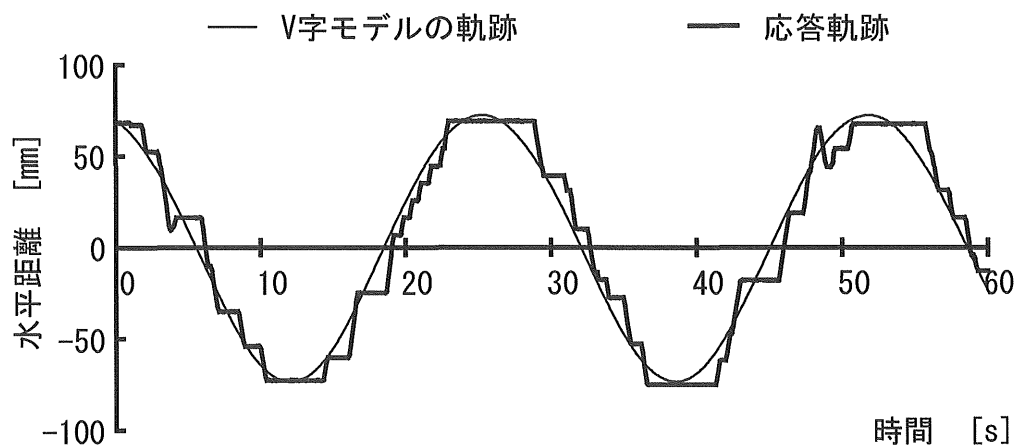
図 6.9 周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.04 Hz）
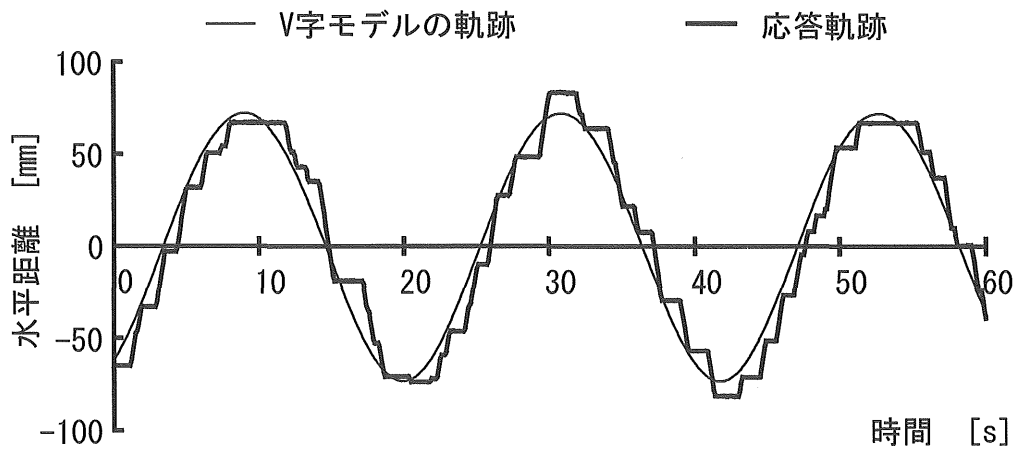
図 6.10 周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.05 Hz）
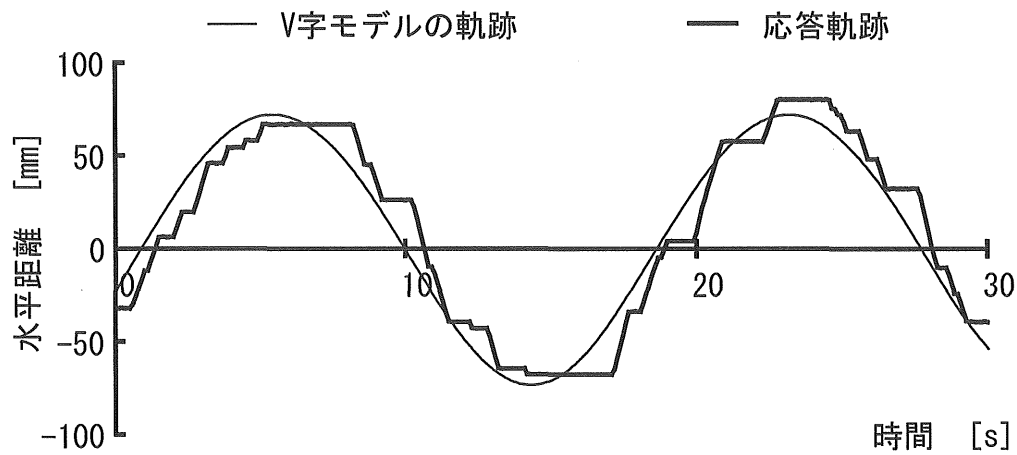
図 6.11 周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.06 Hz）
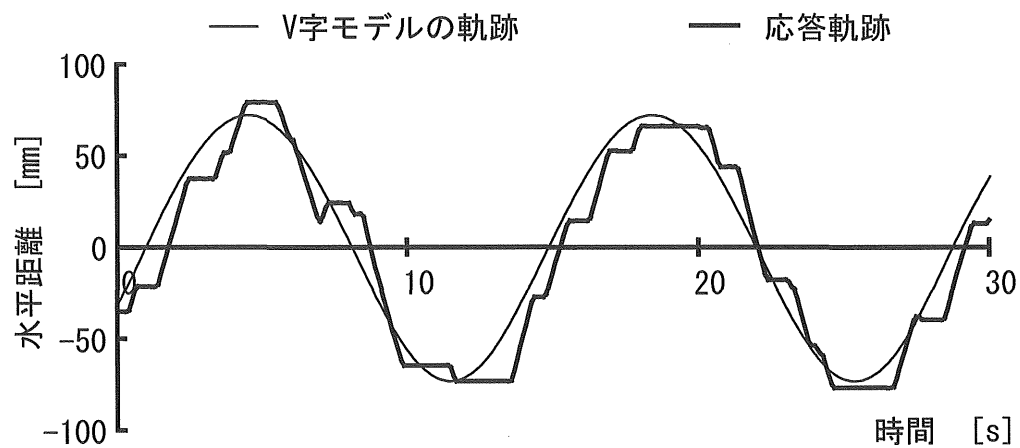
図 6.12 周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.08 Hz）
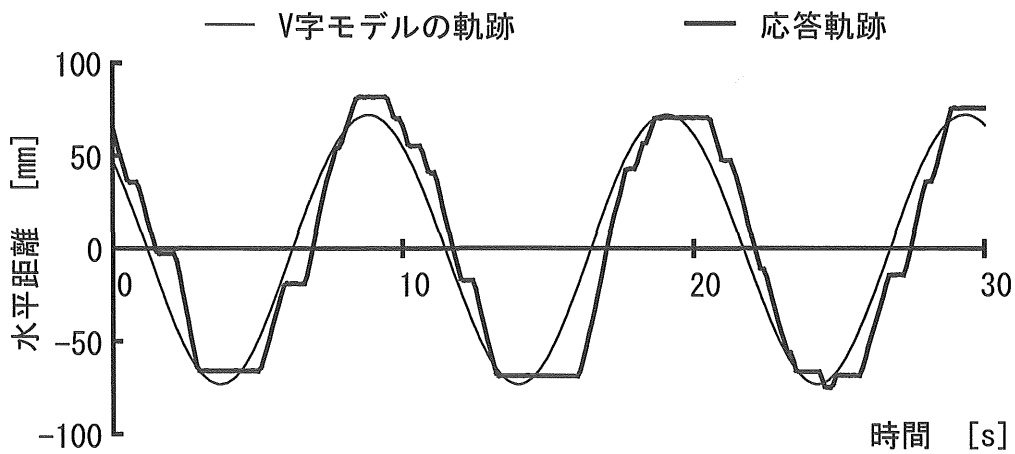
図 6.13　周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.1 Hz）
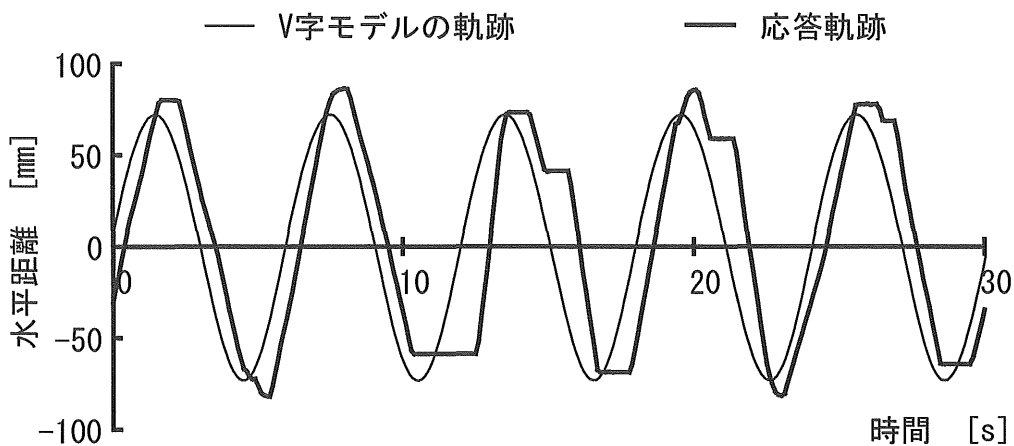
図 6.14　周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.17 Hz）
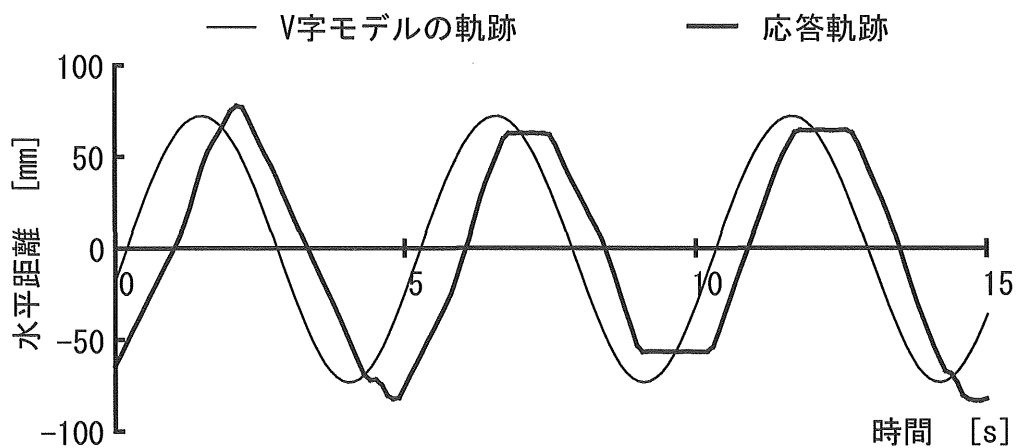
図 6.15　周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.2 Hz）
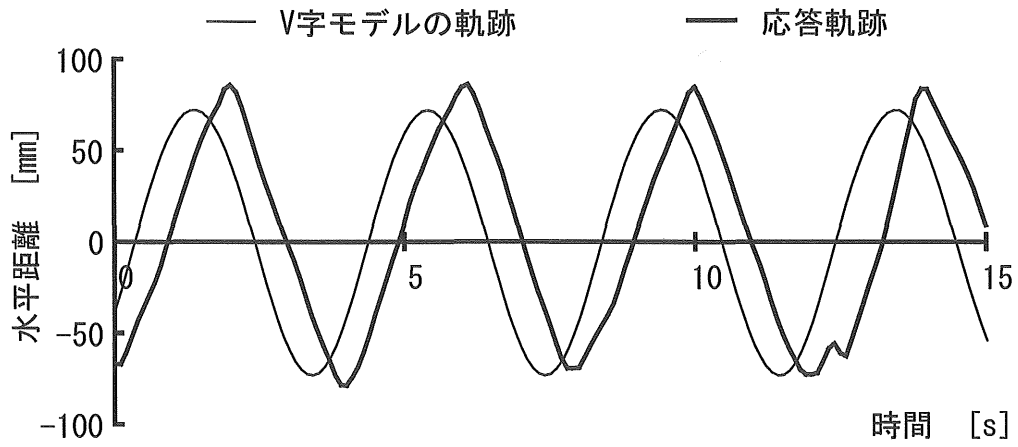
図 6.16　周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.25 Hz）
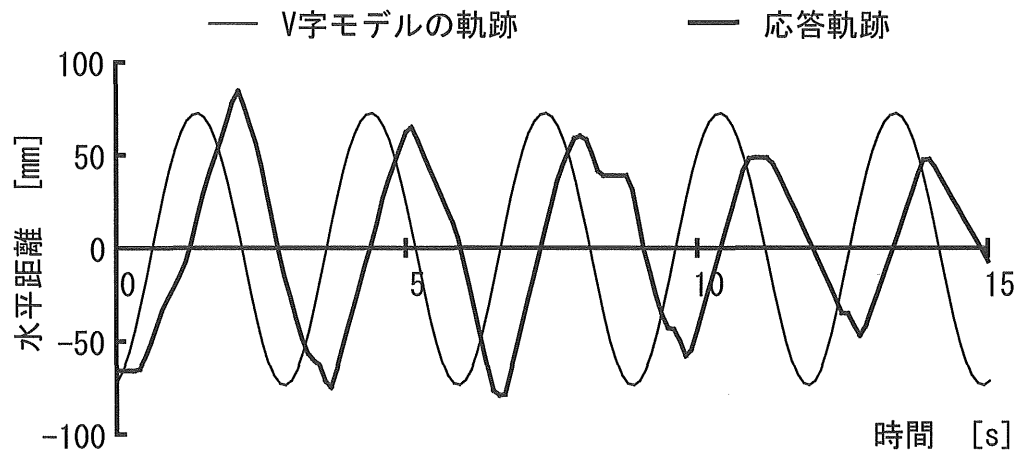
図 6.17　周波数応答軌跡（不感帯±10 mm, 周波数 0.33 Hz）
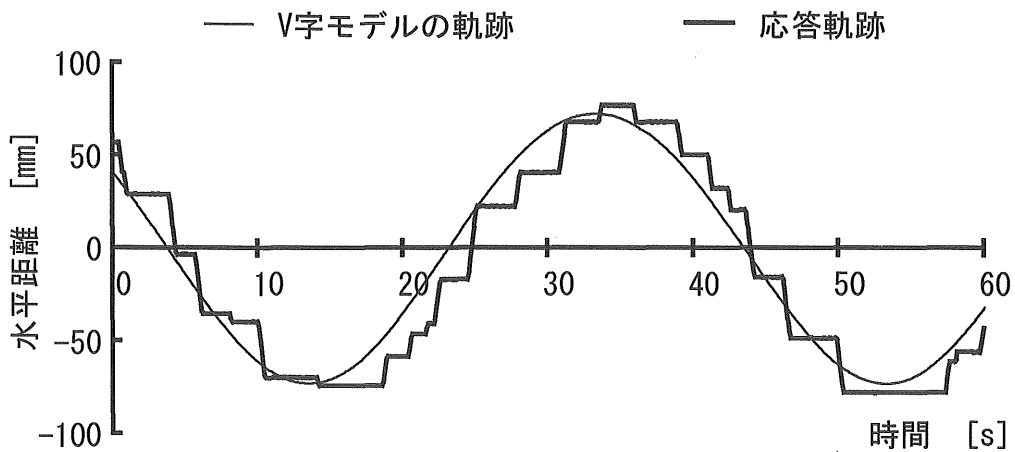
図 6.18 周波数応答軌跡（不感帯±20 mm, 周波数 0.025 Hz）
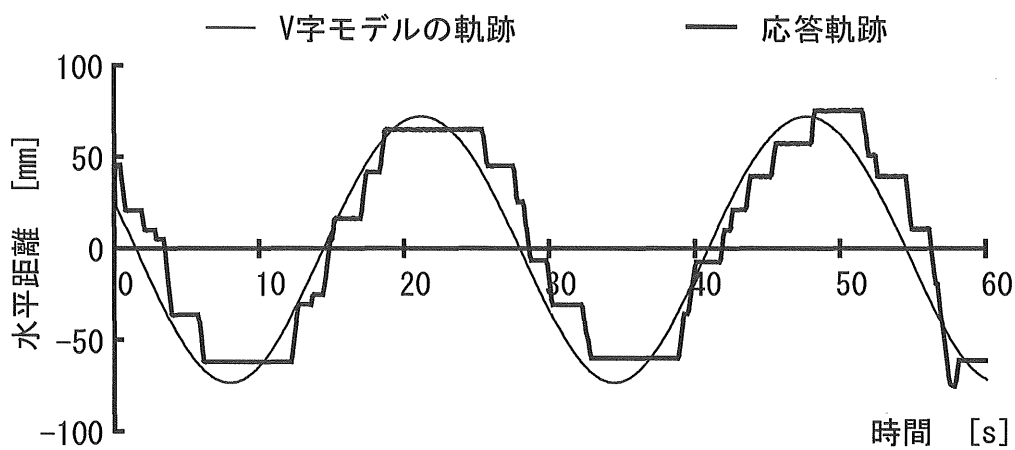
図 6.19 周波数応答軌跡（不感帯±20 mm, 周波数 0.033 Hz）
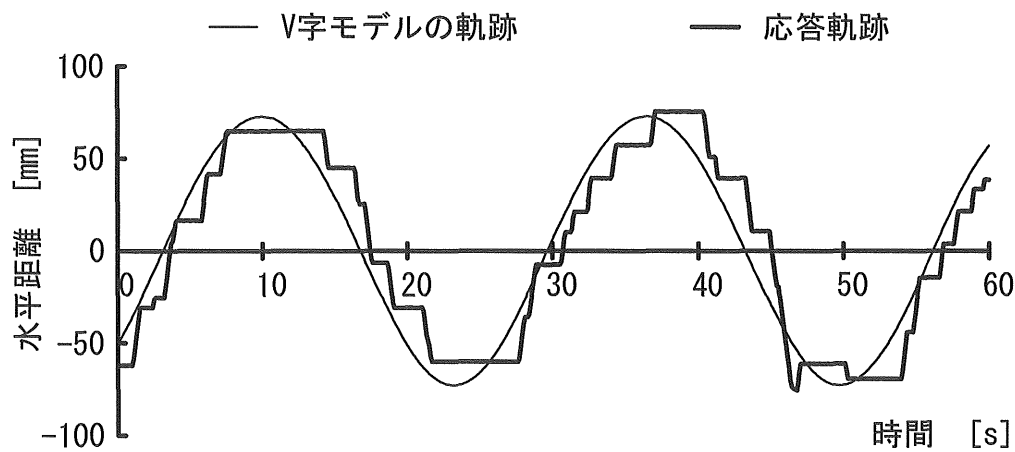
図 6.20 周波数応答軌跡（不感帯±20 mm, 周波数 0.04 Hz）
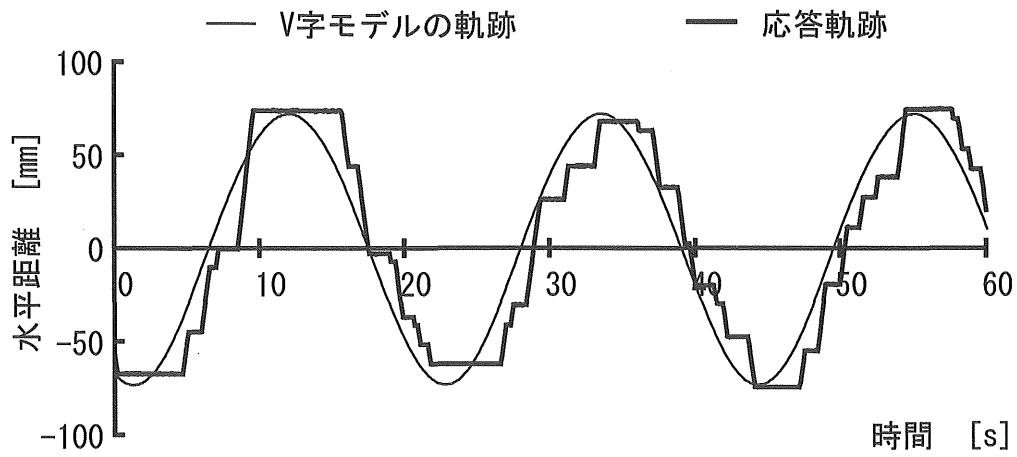
図 6.21　周波数応答軌跡（不感帯±20 mm，周波数 0.05 Hz）
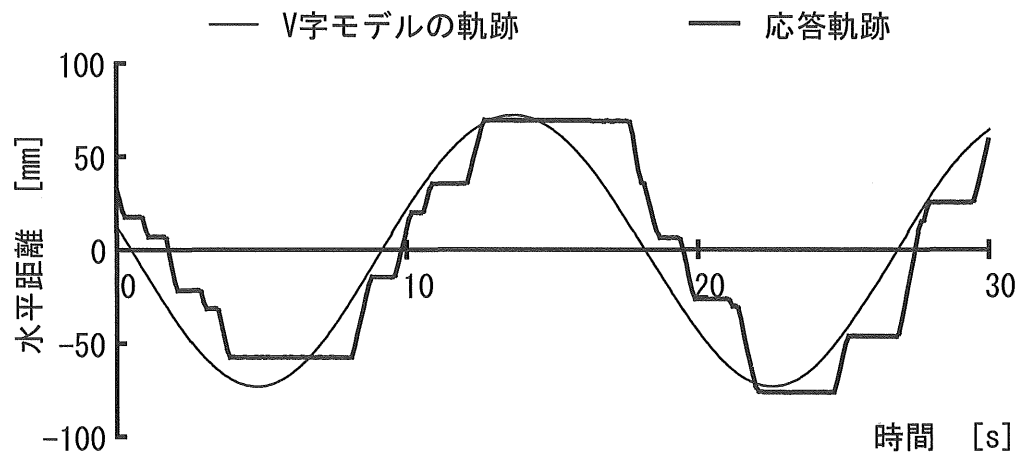
図 6.22　周波数応答軌跡（不感帯±20 mm，周波数 0.06 Hz）
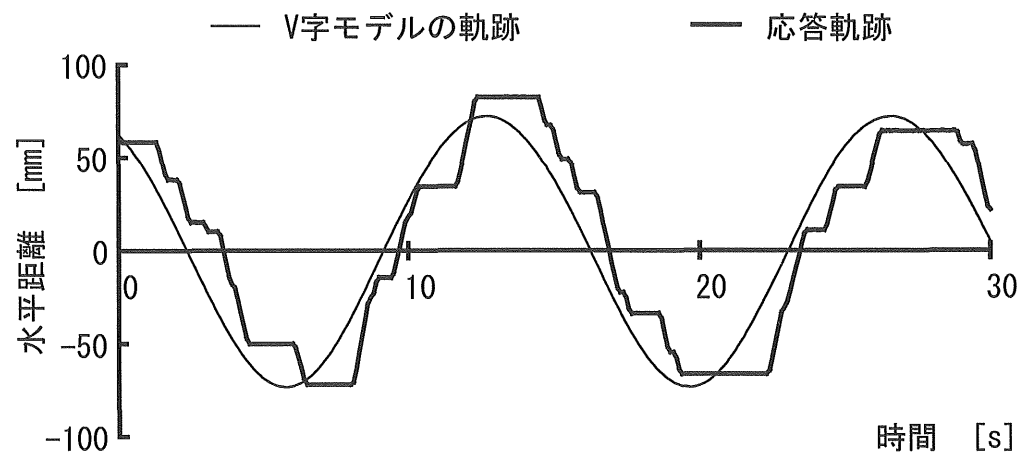
図 6.23　周波数応答軌跡（不感帯±20 mm，周波数 0.08 Hz）
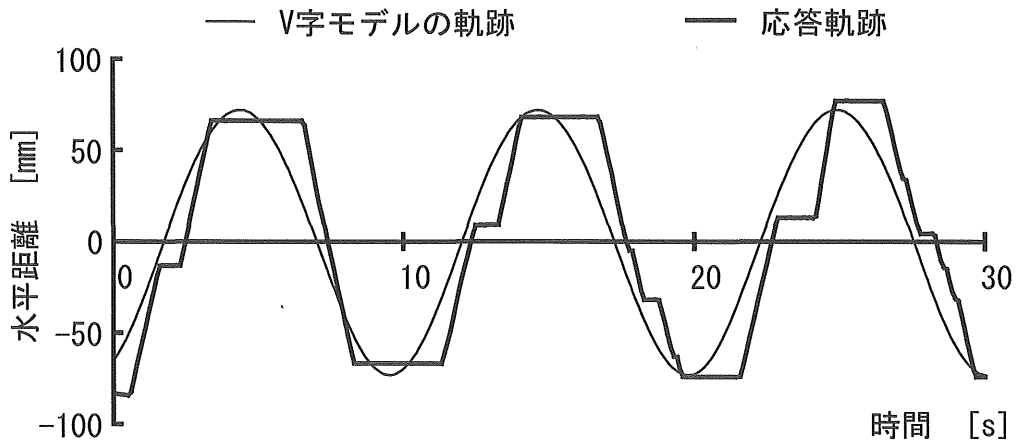
図 6.24 周波数応答軌跡（不感帯±20 mm, 周波数 0.1 Hz）
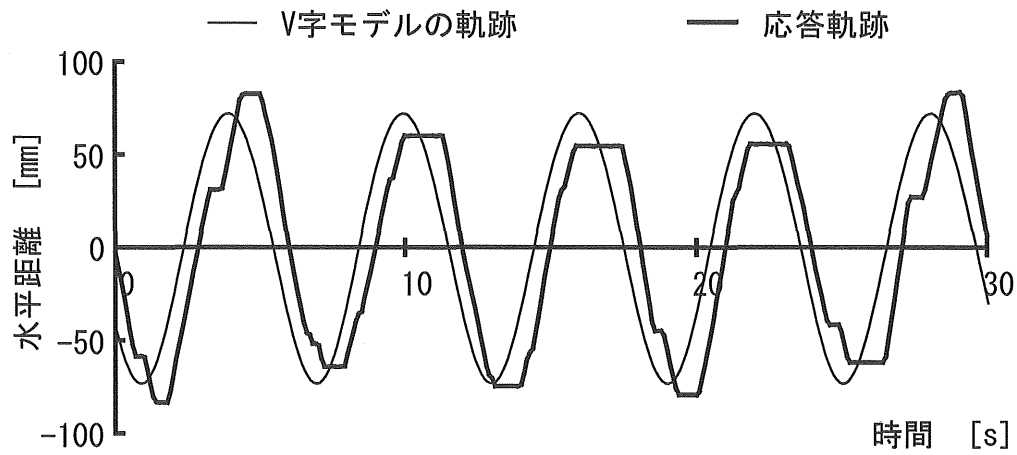
図 6.25 周波数応答軌跡（不感帯±20 mm, 周波数 0.17 Hz）
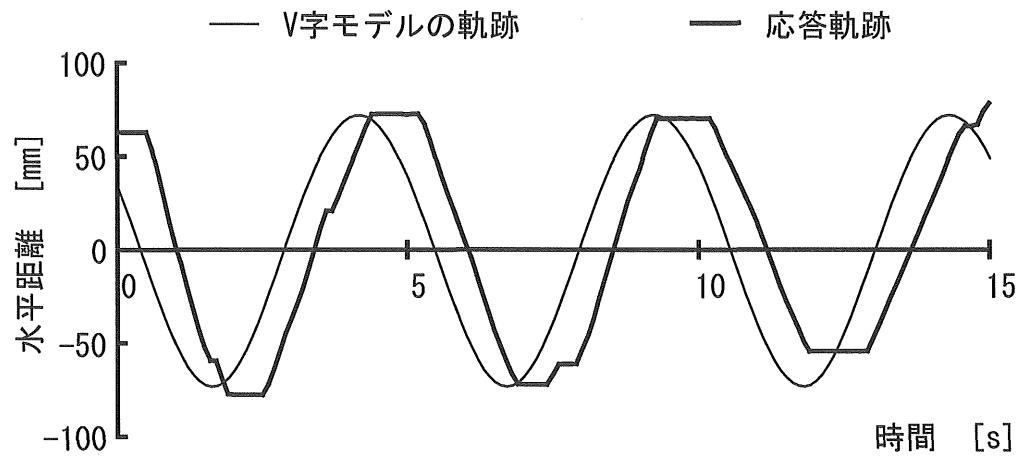
図 6.26 周波数応答軌跡（不感帯±20 mm, 周波数 0.2 Hz）
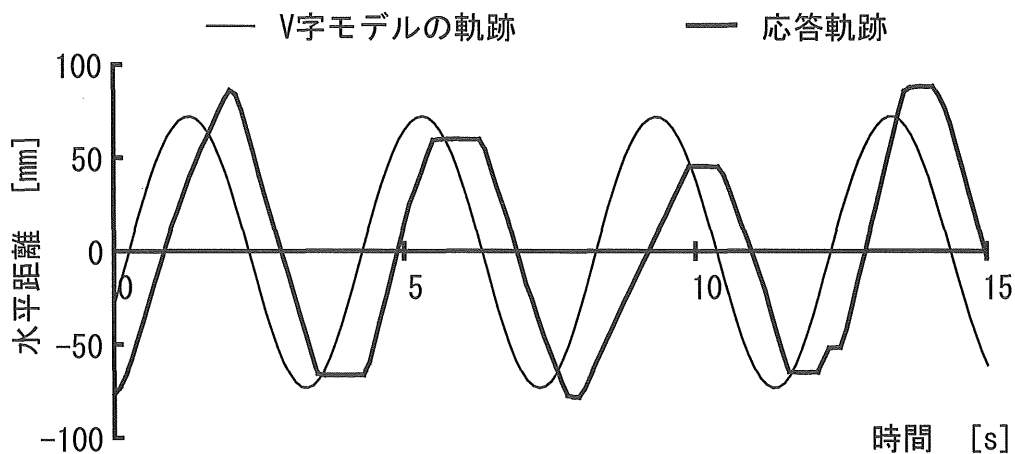
図 6.27　周波数応答軌跡（不感帯±20 mm，周波数 0.25 Hz）
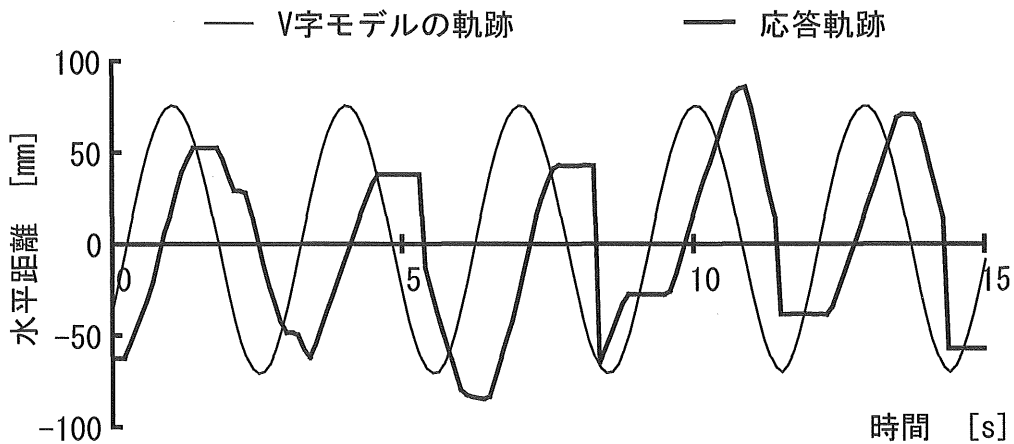
図 6.28　周波数応答軌跡（不感帯±20 mm，周波数 0.33 Hz）

イド装置を自動制御するが，作物列センサとＶ字モデルの偏差すなわち制御誤差が不感帯以内であれば制御信号が出力されないため，電磁弁は動作せず油圧シリンダは停止状態となる。その後，制御目標が動き両者の偏差が不感帯よりも大きくなると再び制御信号が出力され，油圧シリンダが動作するためにこのように，追従軌跡が階段状になった。また，図 6.7 と図 6.13 を比べると周波数

の増加につれて，階段状に動作するステップ量が少なくなる傾向が見られた。これは，周波数が高くなることによって，V 字モデルの移動速度が速くなり，V 字モデルと作物列センサの水平距離の偏差が不感帯に納まっても，またすぐに不感帯を超えてしまうため，制御信号が頻繁に出力されてしまうことに起因する。さらに，同じ周波数でも，図 6.11 と図 6.22 のように不感帯が±10 mm と±20 mm の応答軌跡を比較すると，±20 mm の場合は不感帯が大きいために制御信号が頻繁に出力されず, 全体的に制御の遅れが大きくなる傾向が見られた。

周波数が 0.17～0.33 Hz の条件では，不感帯±10 mm の場合を図 6.14 から図 6.17，不感帯±20 mm の場合を図 6.25 から図 6.28 に示すように，階段状の追従システムの応答軌跡は見られなくなった。これは，V 字モデルの左右の移動速度が速くなり, 追従システムはその制御誤差を解消するように追従動作するが, 常にそれが不感帯より大きくなり，電磁弁が常時作動状態になってしまうためである。

制御システムの周波数応答特性は，一般に 6.1)，6.2)式に示すようにゲイン特性と位相特性で評価される [68,69]。図 6.29 は入力の V 字モデルの正弦波状の軌跡
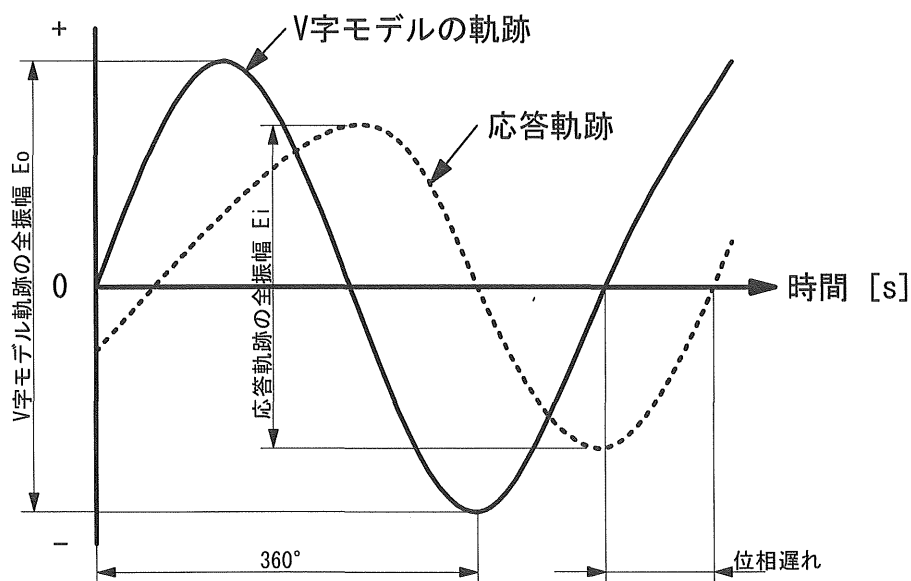
図 6. 29　周波数応答特性の評価方法

と出力の追従システムの応答軌跡を示す。ゲインは 6.3)式のように，V 字モデルの軌跡の全振幅と追従システムの応答軌跡の全振幅の比であり，また位相遅れはその周波数におけるV字モデルの軌跡に対してシステムの応答軌跡の時間的な遅れから求められる角度である。

$$G = |G(j\omega)| \quad 6.1)$$

$$\varphi =< G(j\omega) \quad 6.2)$$

$$G_{\mathrm{dB}} = 20\log_{10} G = 20\log_{10} E_{\mathrm{o}}/E_{\mathrm{i}} \quad 6.3)$$

ここに,

G：伝達要素

$G(jw)$：周波数伝達関数

φ：位相遅れ［°］

G_{dB}：ゲイン，V 字モデルの軌跡と追従システムの応答軌跡の比［dB］

E_{o}：V 字モデルの軌跡の全振幅　[mm]

E_{i}：追従システムの応答軌跡の全振幅　[mm]

ここで，周波数応答特性の実験結果を基に，ボード線図を描き，応答軌跡の周波数特性を分析し，その結果を図 6.30 に示す。横軸は設定した周波数の対数値であり，縦軸はゲイン特性と位相特性を示す。一般に，ゲイン G は変化が大きいので，6.3)式によって，ゲインの値を対数値で計算して評価される。

図に示すように, 制御目標の周波数の増加につれて, ゲインが次第に低下し, 位相遅れが大きくなる傾向が見られる。特に，周波数が 0.1 Hz を超えると，本追従システムの位相遅れは急激に大きくなり，制御の遅れが顕著に現れる特性を示している。しかし，ゲイン−3 dB 以内の最大応答周波数を求めると 0.25 Hz

であり，その時の位相遅れは56°であった。

したがって，本自動追従システムは，周波数0.25Hzの正弦波状に変化する対象物に対して十分に追従できることが判明した。また，第2章の実際圃場で調査したうね自動追従システムに要求される周波数の0.12〜0.18Hzを上回っていることから，実際の作物列の変動に対しても本研究で開発した自動追従システムは十分に追従できると判断できた。
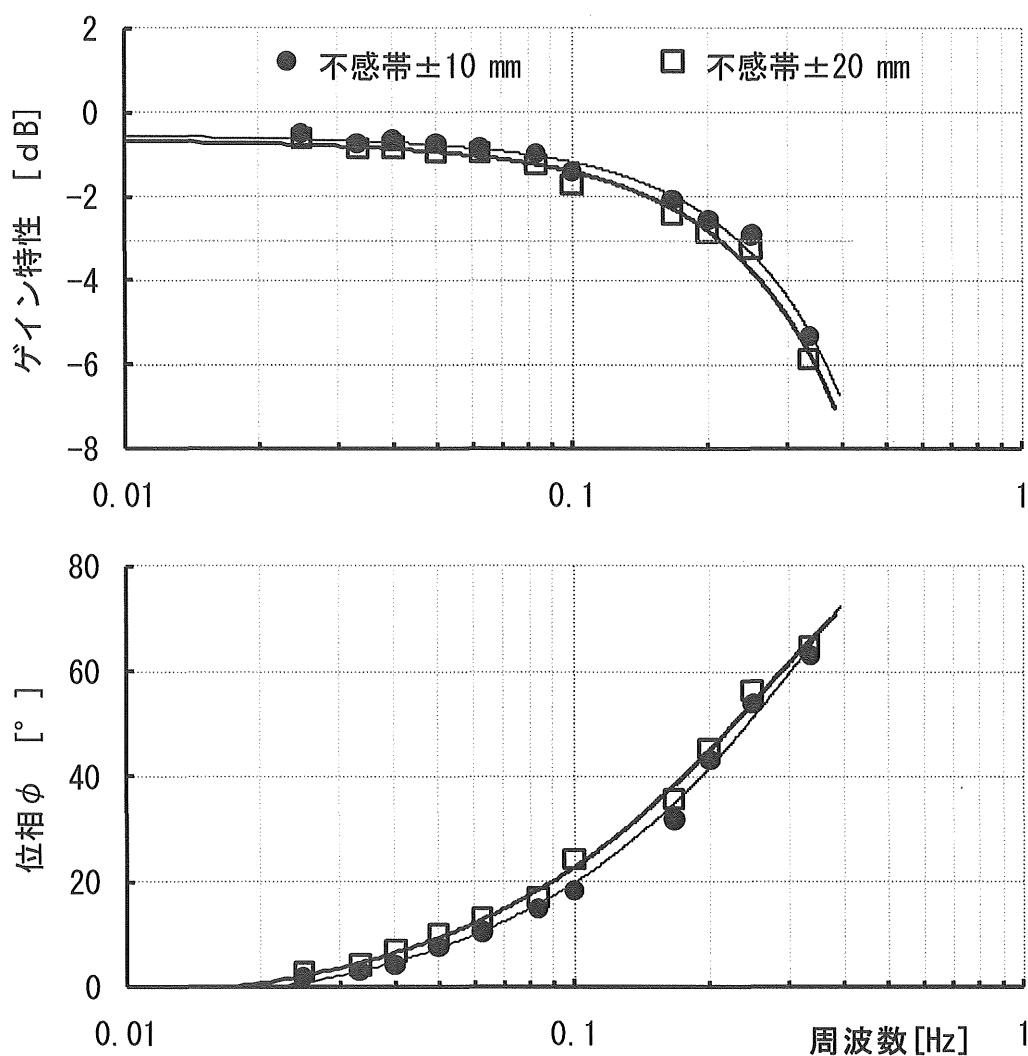
図6.30 周波数応答のボード線図

6.3.2　圃場実験での制御結果の評価

6.3.2.1　ラインマーカ跡の場合の追従制御の結果

図 6.31 は，圃場に播種機でラインマーカ跡を描き，そのラインマーカ跡を制御目標にうね自動追従システムを制御させた場合について作業速度 0.5，1.0，1.5 m/s の 3 段階に変化させた結果を示す。横軸はトラクタの進行距離を示し，いずれのグラフも細線のトラクタ中心の軌跡はラインマーカ跡の中心位置を基準にトラクタが左右に蛇行した軌跡を示す。また，太線は作業機モデルすなわち作物列センサの中心がそのラインマーカ跡に制御された結果を示す。なお，縦軸の正側はトラクタの進行方向に対して左側に位置したことを示し，表 6.3 はラインマーカ跡の追従精度の評価の値を示す。

表 6.3　ラインマーカ跡の追従精度

	トラクタ中心の軌跡	作業機中心の軌跡
作業速度[m/s]	RMS[mm]	RMS[mm]
0.5	43.3	13.1
1.0	50.8	14.5
1.5	66.7	19.4

トラクタの走行速度を 0.5 m/s に設定した場合，トラクタ中心の軌跡は進行距離 20 m 間で−5 mm〜86 mm の範囲で右から左に向かって蛇行し，その最大変動は 4.8 m 付近で 86 mm であり，測定区間全体の RMS は 43 mm であった。一方，作物列センサは下方の V 字溝の位置を検出し，図のように作業機モデルを制御目標に追従制御していることが明らかであり，その最大誤差も 30 mm に納まり，測定区間全体の RMS も 13.1 mm に低下した。また，中図の作業速度を 1.0 m/s に設定した場合は，トラクタ中心の軌跡は−71 mm〜84 mm の範囲で大きく蛇行し，全体の RMS は 50.8 mm であったが，作業機モデルの中心の軌跡は自動追従によって大きく変動せず，RMS は 14.5 mm に留まった。さらに，下図の作業
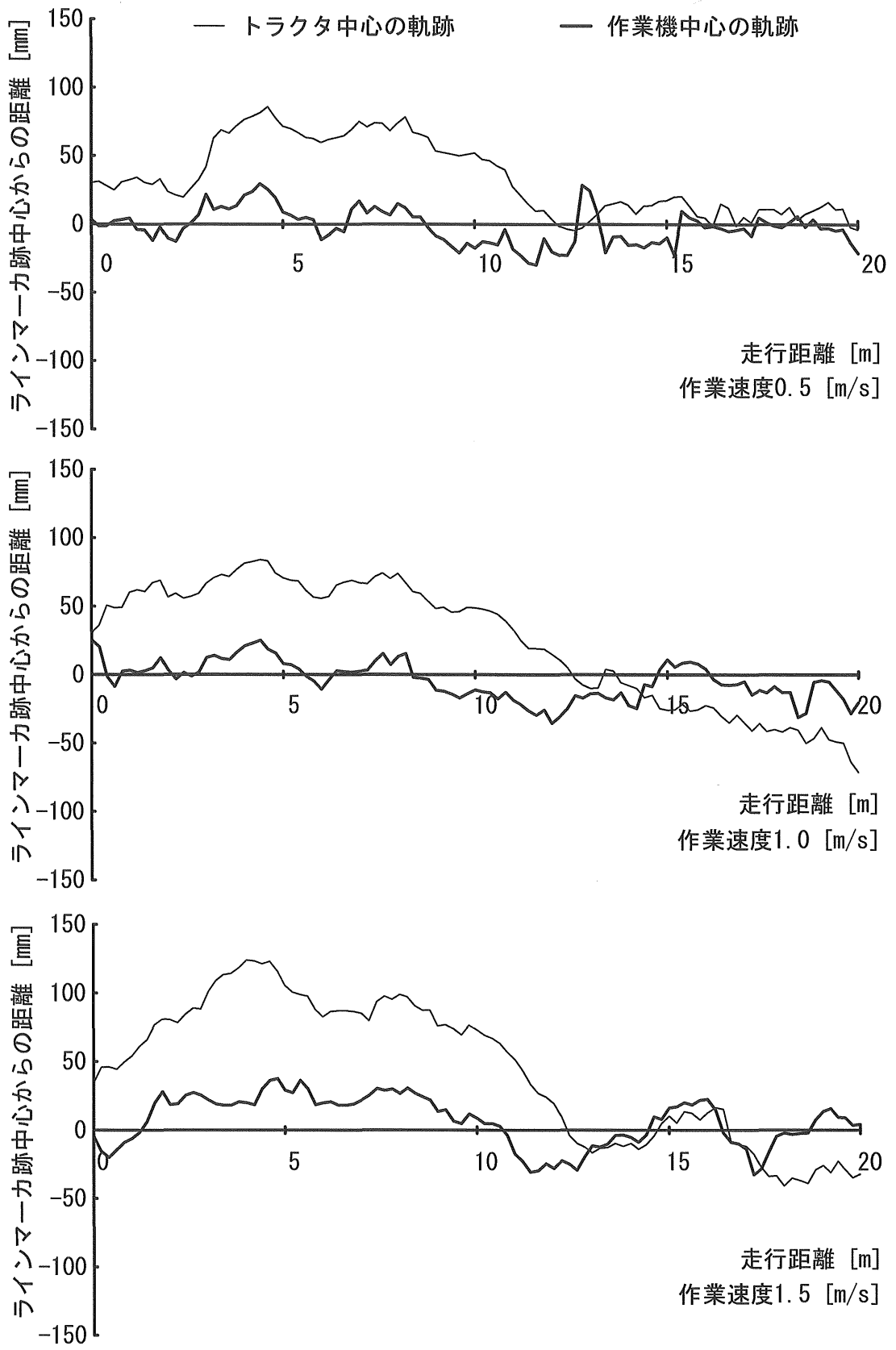
図6.31　追従システムの制御結果　（ラインマーカ跡）

速度を 1.5 m/s に設定した場合，トラクタの軌跡の RMS は 66.7 mm と大きくなったが，作業機モデルの中心軌跡の RMS は 19.4 mm であり，トラクタ軌跡の 29.1% になった。

以上のように，いずれの作業速度でも，トラクタ中心の軌跡を示す細線に対してうね自動追従システムで制御された作業機中心を示す太線は最大でも 37 mm であり，また RMS が 19.4 mm 以下と極めて良好に制御されている。したがって，ラインマーカ跡の追従制御において，本システムは十分なうね追従精度を有していることが確認できた。

6.3.2.2　作物列の場合の追従制御の結果

圃場に大豆を栽培し，その作物列を制御目標とした場合の自動追従システムの制御結果を図 6.32 に示し，表 6.4 はその追従精度の評価の値を示す。なお，図の各軸と図中の線種の意味は前述のラインマーカ跡の場合と同様である。

まず，上図のトラクタの作業速度を 0.5 m/s に設定した場合，トラクタ中心の軌跡は進行方向に対して左側に偏って進行し，8 m 付近で最大 112 mm の変動が生じた。また，進行距離 20 m 間の変動を RMS で求めると 59.7 mm となり，実際の中耕除草作業を考慮すると，第 2 章で述べたようにトラクタ作業者が適切にハンドル操作を行わないと作物に損傷を与える可能性が十分に考えられる。一方，作物列センサを取り付けた作業機モデルの軌跡を見ると，全体的にうね自動追従システムはその作業機モデルを作物列に沿って制御し，その制御誤差の最大は 58 mm であり，その制御誤差の RMS が約 1/3 の 18.6 mm に低下し，良好に制御されたと判断できる。

つぎに，トラクタの作業速度を 1.0，1.5 m/s に設定した場合でも，トラクタが左右に蛇行しているにもかかわらず，0.5 m/s の場合と同様に作業機モデルが作物列に沿って制御されている。特に，図に示すように，作業の後半 15 m から
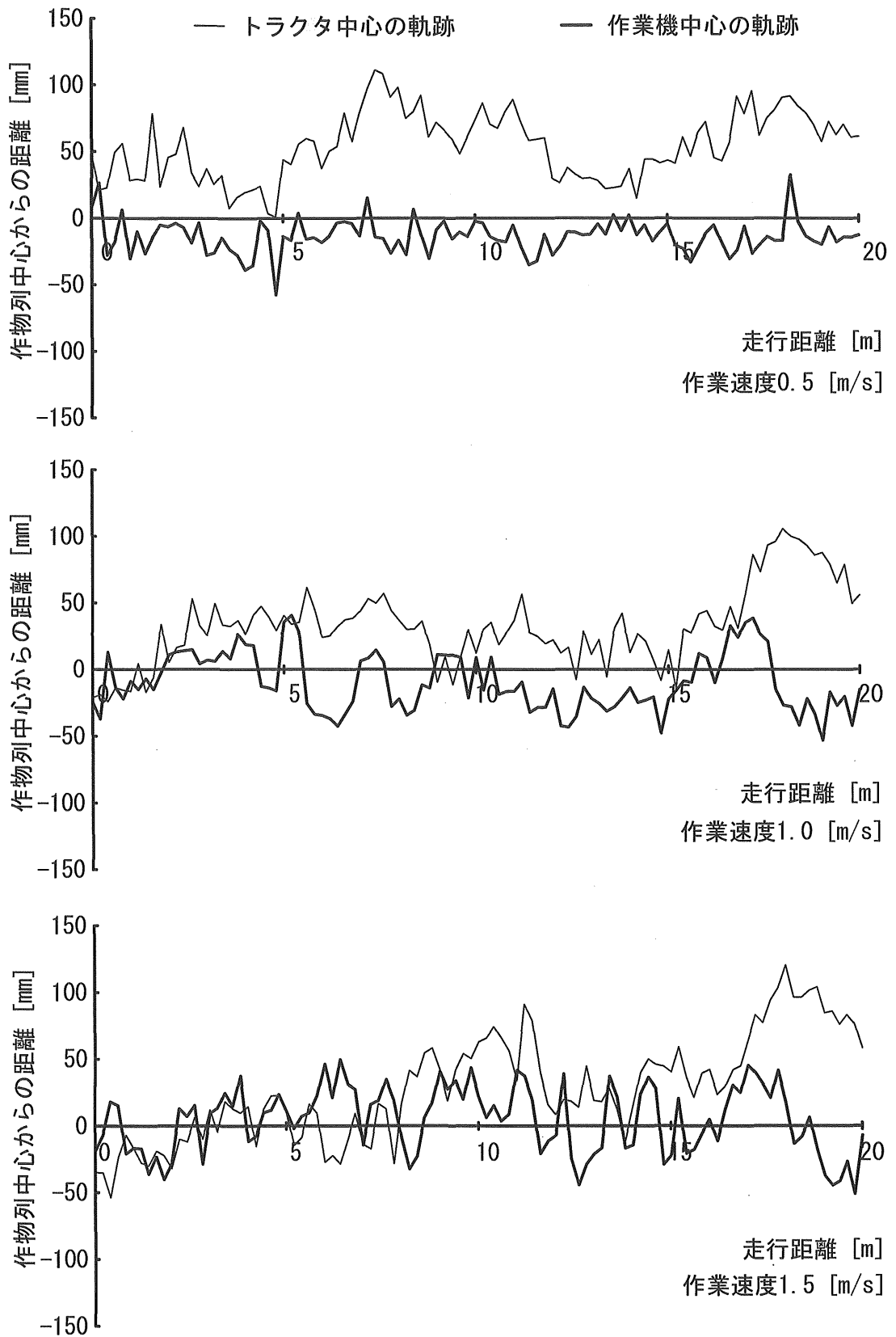
図 6.32　追従システムの制御結果(作物列)

表 6.4　作物列の追従精度

作業速度[m/s]	トラクタ中心の軌跡	作業機中心の軌跡
	RMS[mm]	RMS[mm]
0.5	59.7	18.6
1.0	43.7	23.9
1.5	47.8	25.4

トラクタ中心の軌跡の最大変動はそれぞれの作業速度で 106，120 mm であるのに対し，作業機モデルの中心軌跡は最大でもそれぞれ 41，49 mm と変動が小さくなり，制御目標の作物列に自動追従していることが明らかである。なお，制御誤差の RMS は前述のラインマーカ跡の場合に比べると，若干大きくなるものの，それぞれ 23.9，25.4 mm であった。また，表に示すように，作業速度の増加につれて，本システムの追従精度の RMS は若干増加する傾向が見られた。その原因は，第 4 章で述べたように作業速度が増すと作物列センサの走査間隔と走査角度が大きくなり，センサの検出誤差が大きくなるために生じたと考えられる。しかし，開発したうね自動追従システムの制御誤差の RMS は実験の作業速度範囲内で最大でも 25.4 mm 以下であったことから，本システムはレーザ式作物列センサによって作物列を連続的にかつ非接触に検出し，トラクタ用作業機を制御目標に制御することが精度的にも十分可能であることが明らかになった。

6.4　本章のまとめ

本研究は畑作における播種・移植，中耕除草作業時のトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を最終目的としている。そこで本章は，前章で開発した追従システムの制御精度について室内実験と圃場実験を実施した。

1) 室内実験では，自動追従システムのステップ応答特性と周波数応答特性を実

験的に求め，その制御特性を分析した。ステップ応答特性の場合，本システムは PID 制御の比例要素の部分を採用しており，ステップ距離が大きいほど，油圧シリンダの移動速度は速くなることが確認できた。また，周波数応答特性の場合，周波数が 0.1 Hz 以上になると，位相遅れが急激に大きくなり，制御の遅れが顕著に現れる特性を示した。しかし，ゲイン−3 dB 以内の最大応答周波数を求めると 0.25 Hz であり，その時の位相遅れは 56° であった。したがって，本システムは，0.25 Hz 以内で左右に変化する制御目標に対して十分追従できることが判明した。

2) 圃場実験では，トラクタの作業速度を 0.5，1.0，1.5 m/s に設定し，制御目標のラインマーカ跡で実験を行った結果，本システムの追従制御の誤差の RMS は作業速度の増加に伴い，若干大きくなるものの，その値は 19.4 mm 以下であった。また，作物列の追従実験でも同様な結果になり，追従制御の誤差の RMS は 25.4 mm 以内であったことから，本追従システムは作物列を確実に検出し，トラクタ用作業機をその制御目標に自動制御することが精度的にも十分可能であることが判明した。

以上のように，本研究で開発したうね自動追従システムの追従精度は室内実験と圃場実験で評価され，本システムの有効性が明らかになった。

最後に，本研究は，畑作のうね合わせの高精度・自動化を目的にレーザ式作物列センサと油圧スライド装置を利用したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を目的として実施したものである。開発したレーザ式作物列センサの計測精度や自動追従システムの基本的特性は，本研究で述べたように室内実験や圃場実験でその基本的な性能が明らかとなり，今後のトラクタ作業の自動化や高速化，作業者の労力軽減などに貢献できる基本的な技術と考える。

第7章　総　括

現在，食糧危機に備えて，世界中で食料の増産が必要不可欠な状況にあるにもかかわらず，日本の自給率は低下し続けている。特に，農業従事者の減少と高齢化，それに伴う耕地面積の減少が日本の農業の現状である。このような状況で農地経営の拡大，作業能率の向上を実現して食料の増産を図るには，作業負担の軽減，省力化などの対策が不可欠であるため，トラクタ作業の自動化や高能率化が期待される。そこで，本研究は作物列センサを開発し，それによるトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を目的としている。これまでに，作物列センサに関する研究は，国内外を問わず多く研究されてきた。しかし，既往の研究では，自然光の影響を受けやすいことやコストの面などの問題で実用段階に至っていない。

上記の問題点を踏まえ，簡便で安価なレーザ式作物列センサの開発を行い，それによるトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を行った。

7.1　畑作の播種・移植，中耕除草時のトラクタによるうね合わせ作業の現状とその精度（第2章）

トラクタ用作業機のうね合わせ精度を把握するために，畑作の播種・移植および中耕除草作業時のうね合わせ作業の現状とその精度を調査し，開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムに要求される応答性を調査分析した。

1) トラクタ作業者の作業状態は，播種・移植作業の場合，農場 B の菜豆の播種，農場 C のテンサイの移植作業では，作業者がトラクタの後方を確認する割合は 10%以下であったが，農場 A のバレイショの播種は 15.9%であった。一方，中耕除草作業では，農場 D のテンサイ圃場で 27.2%，農場 E の小豆圃場では 15.5%となり，トラクタ作業者の後方確認割合が高くなる結

果となった。

2) 各農場のうね合わせの作業精度は，播種・移植作業の場合，農場A，B，Cの隣接行程のうね間は，作業者が設定したうね間に対してそれぞれ最大11.5，9.5，7.5 cm 変動した。また，中耕除草作業のうね合わせ作業では，トラクタ用作業機はうね間の中心すなわち作物列に沿って水平位置が概ね調節されているが，その最大変動は農場Dが8.2 cm，農場Eが7.2 cmに達したことから，作物に機械的な損傷を与えることも観察された。

3) 圃場調査から求めた開発目標のうね追従システムに要求される応答性は，トラクタの作業速度を2.0 m/sに想定すると，播種・移植作業では作業機をうねに追従させるためのアクチュエータの制御速度は6.6 cm/s と推定された。また，中耕除草作業では，播種・移植作業と比較すると，制御速度の最大が大きくなり，制御速度は10 cm/s となった。

以上のように，畑作の播種・移植，中耕除草作業はトラクタ作業者にとって重労働であり，作業者の労力を軽減し，より高能率で高精度なうね合わせ作業を実現するためにはトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発は極めて重要である。

7.2 レーザ式作物列センサの開発（第3章）

開発したレーザ式作物列センサは主に，レーザ変位センサ，6 面体ポリゴンミラー，可変速モータ，ロータリエンコーダおよびコンピュータで構成されるが，本章では作物列センサの計測原理や概要，作物列検出のソフトウェアについて述べた。

1) 本研究で供試したレーザ変位センサはCCD方式で，その測定距離は250～750 mmであり，対象物までの距離を非接触で計測できる。また，センサは

トラクタ用作業機に取り付けられるが，進行方向に対して横方向下方の土壌表面や作物の高さ形状を計測する。そのために，可変速モータを用いて6面体ポリゴンミラーを回転させ，レーザ変位センサから発するレーザ光の向きを変え，下方の断面形状を計測できるようにした。

2) 作物列センサの距離情報や角度情報から作物列の水平位置を算出するために自作の計測用パーソナルコンピュータを供試し，C 言語による計測用プログラムを開発した。

3) 供試したレーザ変位センサのサンプリング間隔の影響で，ポリゴンミラーの回転数を高くすると小さな作物の葉を検出できなくなる。基礎実験の結果，本研究の作物列センサの場合，ポリゴンミラーの回転数は 100～140 rpm が最適であることが判明した。

以上のように，本章では，レーザ式作物列センサを開発し，その計測原理と概要について述べた。

7.3　レーザ式作物列センサの計測精度の評価（第4章）

この章では，前章で開発したレーザ式作物列センサの位置計測精度について室内実験と圃場実験を実施して評価した。

1) 室内実験において，センサは水平面上に置かれた作物モデルの水平位置をセンサ中心から左右±180 mm の範囲で計測可能であり，V 字モデルと作物モデルを検出した場合の検出誤差 RMS はいずれのセンサの設定高さにおいてもその最大が 5.7 mm であった。

2) 圃場実験において，V 字溝のラインマーカ跡を計測した実験では，トラクタの作業速度を 0.5～1.5 m/s に設定した場合，センサが検出した位置の誤差の RMS は 20 mm 以下であった。また，作業速度が増加しても誤差の RMS

は大きく変化しなかったことから，ラインマーカ跡を検出する場合にはトラクタの作業速度には影響されないと言える。

3) 実際の圃場に作付けした大豆の作物列の検出実験の場合は，トラクタの作業速度が増加するにつれてセンサの検出誤差の RMS は 17 mm から 29 mm に増加したものの，全体的には作物列センサでその作物列の水平位置を計測することは精度的にも十分であり，作物列センサの有効性が圃場実験でも確認できた。

以上のように，本研究で開発したレーザ式作物列センサはトラクタ用作業機のうね自動追従システムのセンサとして十分に利用可能であると結論づけられた。

7.4 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの油圧制御機構の開発（第5章）

この章では開発したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの油圧制御機構の概要とその基本的な制御特性について述べた。本研究の油圧制御機構は主に油圧スライド装置，油圧ポンプ，電磁弁，計測制御用コンピュータおよび制御ソフトウェアで構成される。

1) 油圧スライド装置はトラクタのロワーリンクと作業機のロワーリンクヒッチの間に取り付けられ，油圧シリンダによって作業機を左右に移動させるものである。

2) 油圧制御機構の制御特性は制御電圧の正負によって，動作方向を制御し，電流の大きさによって制御速度を変えることができる。なお，制御電圧を ±1～±8 V の範囲に設定すると，制御電圧と油圧シリンダの移動速度は正比例関係となり，線形制御が可能となった。

3) 本研究で開発した制御ソフトウェアは，トラクタ用作業機のうね追従制御を滑らかにかつ迅速に行うためにPID制御の比例要素の部分を基本とし，さらに制御の安定性を向上させるために不感帯処理法や移動平均法などを採用した。

7.5 うね自動追従システムの制御精度の評価（第6章）

この章は，前章で開発したうね追従システムの制御精度について室内実験と圃場実験で評価した。

1) 室内実験では，自動追従システムのステップ応答特性と周波数応答特性を実験的に求め，その制御特性を分析した。ステップ応答の場合，本システムはPID制御の比例要素の部分を採用しており，ステップ距離が大きいほど，油圧シリンダの移動速度は速くなることが確認できた。また，周波数応答の場合，周波数が0.1 Hz以上になると，位相遅れが急激に大きくなり，制御の遅れが顕著に現れる特性を示した。しかし，ゲイン−3 dB以内の最大応答周波数を求めると0.25 Hzであり，その時の位相遅れは56°であった。したがって，本システムは，0.25 Hz以内で左右に変化する制御目標に対して十分追従できることが判明した。
2) 圃場実験では，トラクタの作業速度を0.5，1.0，1.5 m/sに設定し，制御目標のラインマーカ跡で実験を行った結果，本システムの追従制御の誤差のRMSは作業速度の増加に伴い，若干大きくなるものの，その値は19.4 mm以下であった。また，作物列の追従実験でも同様な結果になり，追従制御の誤差のRMSは25.4 mm以内であったことから，本追従システムは作物列を確実に検出し，トラクタ用作業機をその制御目標に自動制御することが精度的にも十分可能であることが判明した。

以上のように，本研究で開発したうね自動追従システムの追従精度は室内実験と圃場実験で評価され，本システムの有効性が明らかになった。

7.6　結語

最後に，本研究は，畑作のうね合わせの高精度・自動化を目的にレーザ式作物列センサと油圧スライド装置を利用したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を目的として実施したものである。開発したレーザ式作物列センサの計測精度や自動追従システムの基本的な制御特性は，本論文で述べたように室内実験や圃場実験でその基本的な性能が明らかとなり，今後のトラクタ作業の高精度自動化や高速化，作業者の労力軽減などに貢献できる基本的な技術と考える。

量記号一覧

RMS	：	二乗平均平方根，統計値の散らばり具合を表す数値　[mm]
PSD	：	単位距離当たりの振動波形の平均エネルギー　[cm^2/Hz]
α	：	レーザ式作物列センサの検出角度　[°]
L	：	レーザ式作物列センサの計測距離　[mm]
h	：	レーザ式作物列センサと土壌表面との垂直距離　[mm]
P	：	作物列の中心点
x	：	求める作物列の水平位置　[mm]
y	：	P 点の y 軸座標
x_1	：	二値化処理を行って枠の左側端の水平距離　[mm]
x_2	：	二値化処理を行って枠の右側端の水平距離　[mm]
n	：	データ数
x_i	：	基準値に対する誤差　[mm]
Cv	：	変動係数，データの変動を相対的に表すもの　[%]
R^2	：	決定係数，相関係数を 2 乗したもの
PID	：	比例要素，積分要素，微分要素を合わせて構成される制御方式
G	：	伝達要素
$G(jw)$	：	周波数伝達関数
φ	：	位相遅れ［ ° ］
G_{dB}	：	ゲイン，V 字モデルの軌跡と追従システムの応答軌跡の比 [dB]
E_{o}	：	V 字モデルの軌跡の全振幅　[mm]
E_{i}	：	追従システムの応答軌跡の全振幅　[mm]

謝　辞

本研究論文は，2006年4月から2009年3月まで，博士課程の学位論文として，岩手大学大学院連合農学研究科生物環境科学専攻（帯広畜産大学所属）博士課程在学中に行われたものである。

本研究の遂行と論文をまとめるにあたり，帯広畜産大学畜産学部地域環境学研究部門地域環境工学分野の佐藤禎稔准教授には主指導教官として，研究計画から研究方法，圃場調査，分析方法および本研究論文の作成まで，全般にわたり終始懇切丁寧に御指導をいただき，心から深甚な感謝の意を申し上げます。佐藤先生には学部からの長きにわたり終始かわらぬ暖かいご指導とご鞭撻を賜っただけでなく，研究者としての，また一人の人間としての生き方についても多くのことを学ばせていただき，貴重な財産となりました。

また，帯広畜産大学畜産学部地域環境学研究部門地域環境工学分野の岸本正准教授をはじめ，弘前大学農学生命科学部園芸農学科生物生産環境学研究室の張樹槐准教授，岩手大学農学部農学生命課程の武田純一准教授には，本研究の取りまとめにあたり，終始懇切なるご指導と論文のご校閲を賜りました。記して謝意を表します。

元帯広畜産大学教授，現十勝農業機械協議会事務局長の松田清明先生には，本研究のご指導のほか学業生活の面などでもたくさんの面倒を見ていただき，深く感謝しております。本研究の実験装置の立案や製作にあたり，ご協力をいただいた元帯広畜産大学技官の神田晃氏，および現本学非常勤職員の飯島和司氏に心から感謝します。それから，本学在学中に共同研究としてご協力をいただいた研究室の佐藤栄基先輩，村上匡由君，小椋聡君，片岡章君をはじめ同輩後輩の研究室の学生に対して心からお礼を申し上げます。

お忙しいところ本研究の圃場調査にご協力をいただいた幕別町の渡辺農場と

杉本農場，帯広市川西地区の高田農場と渋谷農場，佐藤農場，小野嶋農場の方々にお礼を申し上げます。

さらに，在学中に奨学金を頂いた，平和中島財団，日本政府文部科学省に深く感謝の意を表します。

最後に，日本に留学して以来，長きに渡って支えていただきました専修大学北海道短期大学の工藤正義教授と美唄市の農家貞広一夫氏ご一家に心より御礼申し上げます。ありがとうございました。また末尾ながら，遅い帰りと休日の通学にも理解を示してくれた家族や励ましてくれた中国在住の両親および義父母に対して心から感謝します。

参考文献

1) 久野貴敬:日本農業復活への農業機械の役割について，農機誌 70(3)，1-2，2008

2) 陳軍，武田純一，鳥巣諒，朱忠祥：連結車両型移動ロボットの後退制御について（第 1 報），農機誌 68(1)，104-110，2006

3) 陳軍，武田純一，鳥巣諒，朱忠祥：連結車両型移動ロボットの後退制御について（第 2 報），農機誌 68(1)，111-118，2006

4) 橋本直樹：見直せ日本の食料環境，養賢堂，59，2004

5) 岡本博史，端俊一，高井宗宏：自動うね合わせのための作物列センサ（第 1 報），農機誌 61(6)，159-167，1999

6) 岡本博史，端俊一，高井宗宏：自動うね合わせのための作物列センサ（第 2 報），農機誌 62(2)，66-72，2000

7) 石田茂樹，下名迫寛，宮本啓二，松田清明，山島由光，白旗雅樹：畑作用株間除草機の除草性能（第 1 報），農作業研究 30(3)，191-198，1995

8) 飯野泰明，岡本博史，片岡崇，端俊一：ハイパースペクトルイメージングによる作物と雑草の識別，　農機北支部報 45，21-26，2005

9) 松田清明，宮本啓二，下名迫寛，石田茂樹，山島由光，白旗雅樹：畑作用株間除草機の除草性能（第 2 報），農作業研究 30(3)，199-205，1995

10) 佐藤禎稔，松田清明，佐藤栄基，申　宝明：三次元視覚センサによる作物列出システムの応用，農機北支部報 44，29-34. 2004

11) Satow T., Matsuda, K., Shen B., Hironaka K.,　D.L.S. Tan : Development of laser crop row sensor for automatic guidance system of implements,　Automation technology for Off-Road Equipments 2004,　American society of agricultural engineers,　USA. ISBN 1-892769-45-X: 131-139

12) 箕浦邦雄，西崎邦夫，岸本正：北海道十勝地方の畑作・酪農におけるトラクタ運転姿勢，農機誌 69(2)，79-86，2007

13) Wilrodt, F.L.: Steering attachment for tractors, U.S. Patent, No. 1506706, 1924

14) Andrew, F.W.: Automatic tractor control, U.S. Patent, No. 2259193, 1941

15) Richey, C.B.: "Automatic Pilot" for farm tractors, Agricultural engineering 40 (2), 78-79, 93, 1959

16) Gilmour, W.D.: An automatic control system for farm tractors, Journal of agricultural engineering research 5 (4), 418-432, 1960

17) Wolfe, J.S., Bull, D.A.: Tractor steering in row crop cultivations III. Influence of the steering gear ratio on steering performance, Journal of agricultural engineering research 5 (4), 406-417, 1960

18) Sieling, S.: Self-steering tractor ready for production, Farm mechanization, 282, 1962

19) Mittebach, B.: Ein automatishen pflug, Landtechnishe forschung 13 (2), 51-52, 1963

20) Rushing, K.: Developing the driverless tractor, Agricultural engineering 52 (5), 260–262, 1971

21) Warner, M.G.R., Harries, G.O.: An ultrasonic guidance system for driverless tractor, Journal of agricultural engineering research 17 (1), 1-9, 1972

22) 池田善郎他：コンバインの自動操向装置に関する研究，農機誌 35(4)，368-377，1974

23) 笈田昭，田野信博：トラクタの自動走行，農機誌 38(3)，438-440，1976

24) 三竿善明：自動操向トラクタの開発（第１報），農機誌 51(1)，21-28，1989

25) 韋学軍，高井宗宏：低速無人作業機の自動操向制御に関する研究（第１報），農機誌 52(5)，19-26，1990

26) 端俊一，高井宗宏：一次元イメージセンサを使用した作物列センサ，農機誌 54(1)， 1992

27) 草野信之，伊能憲英，木谷収，岡本嗣男，鳥居徹：自律走行のための作物列の画像処理に関する研究（第１報），農機誌 57(4)， 37-44， 1995

28) 鹿沼隆宏，岡本嗣男，鳥居徹：画像処理による作物列検出および自己位置同定（第１報），農機誌 59(2)， 57-63， 1997

29) 鳥居徹，木谷収，岡本嗣男，草野信之，伊能英憲：自律走行のための作物列の画像処理に関する研究（第２報），農機誌 57(6)， 53-39， 1995

30) 鳥居徹，岡本嗣男，高見沢暁，鹿沼隆宏：画像処理による作物列検出および自己位置同定（第２報），農機誌 59(5)， 37-44， 1997

31) Torii, T., Kitade, S., Teshima, T., Okamoto, T., Imou, K., Toda, M.: Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision (part 1), Journal of JSAM 62 (2), 41-48, 2000

32) Torii, T., Takamizawa, A., Okamoto, T., Imou, K.: Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision (part 2), Journal of JSAM 62 (5), 37-42, 2000

33) 寺脇正樹，片岡崇，岡本博史，端　俊一: 形状特徴によるテンサイと雑草の識別，農機誌 64(2)，57-63，2002

34) 山崎哲，端俊一，片岡崇，岡本博：農用機械の自律直進走行のための画像処理アルゴリズム，農機北支部報 43，17-22，2003

35) ECO-DAN, Local positioning system, 2005
http://www.eco-dan.com/download/brochurer/eco-dan-uk-lowpdf

36) Pichon, D.J., Steinburegge, G.W.: Propagating audio-frequency magnetic flild through soil, Transactions of the ASAE 8 (2), 264-266, 1965

37) Grovum, M.A., Zoerb, G.C.: An automatic guidance system for farm tractors,

Transactions of the ASAE, 565-573, 576, 1970

38) 中村明徳：電磁誘導方式無人搬送車の特徴，無人搬送システムガイドブック 45-48，流通研究社（東京）1986

39) 大下泰生, 他：自動走行管理機の開発（第 1 報）, 農機東北支部報 34, 31-36, 1987

40) Shmulevich, I., Zeltzer, G., Brunfeld A.: Laser scanning method for guidance of field machinery, Transactions of the ASAE 32 (2), 425-430, 1989

41) Toda, M., Kitani, O., Okamoto T., Torii T.: Navigation method for a mobile robot via sonar-based crop row mapping and fuzzy logic control, Journal of agricultural engineering research 72 (4),299-309, 1999

42) Sφgaard, H.T.: Evaluation of the accuracy of a laser optic position determination system, Journal of agricultural engineering research 74, 275-280, 1999

43) Ahamed,T., Takigawa, T., Koike, M., Honma, T., Hasegawa, H., Zhang, Q.: Navigation using a laser range finder for autonomous tractor (Part 1), Journal of JSAM 68 (1), 68-77, 2006

44) Ahamed,T., Takigawa, T., Koike, M., Honma, T., Hasegawa, H., Zhang, Q.: Navigation using a laser range finder for autonomous tractor (Part 2), Journal of JSAM 68 (1), 78-86, 2006

45) Shen, B., Satow, T., Hironaka, K., Zhang, S.: Development of laser crop row sensor for automatic guidance system of tractor-mounted implements, Journal of JSAM 70 (6), 90-96, 2008

46) 佐藤禎稔，宮本啓二，松田清明：三次元視覚センサによるキャベツ結球の形状計測と収穫適期判定，農機誌 63(1)，87-92，2001

47) Choi, C.H., Erbach, D.C., Smith, R.J.: Navigational tractor guidance system, Transactions of the ASAE 33 (3), 699-706, 1990

48) 石井一暢，寺尾日出男，野口伸：学習機能を有した自律走行車両に関する研究（第１報），農機誌 56(4)，53-60，1994
49) 石井一暢，寺尾日出男，野口伸：学習機能を有した自律走行車両に関する研究（第２報），農機誌 57(6)，61-67，1995
50) 石井一暢，寺尾日出男，野口伸：学習機能を有した自律走行車両に関する研究（第３報），農機誌 60(1)，51-58，1998
51) 石井一暢，寺尾日出男，野口伸，木瀬道夫：学習機能を有した自律走行車両に関する研究（第４報），農機誌 60(2)，53-58，1998
52) 井上慶一，大塚寛治，杉本光穂，村上則幸，黎文：自律走行のための GPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサーフュージョン技術，農機誌 61(4)，103-113，1999
53) Pinto, F.A.C., Reid, J.F., Zhang, Q., Noguchi, N.: Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis, Journal of agricultural engineering research 75, 257-264, 2000
54) 木瀬道夫，野口伸，石井一暢，寺尾日出男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット（第 1 報），農機誌 63(5)，74-79，2001
55) 木瀬道夫，野口伸，石井一暢，寺尾日出男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット（第 2 報），農機誌 63(5)，80-85，2001
56) 木瀬道夫，野口伸，石井一暢，寺尾日出男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット（第 3 報），農機誌 64(2)，102-110，2002
57) Inoue, K., Murakami, N., Miyaura, S.: A Modeling of a movement of a semi-crawler tractor and an adaptive operational steering control, automation technology for Off-Road Equipments 2004,　American society of agricultural engineers,　USA. ISBN 1-892769-45-X: 348-359
58) ビートハーベスタ取扱説明書，東洋農機株式会社，2008

59) ビートハーベスタ取扱説明書，日農機製工株式会社，2008

60) 飯澤理一郎：北海道農業動向解析，農機誌 68(5)，9-12，2006

61) 十勝農業協同組合連合会：十勝の農業 2005，1，2005

62) 農業センサス：農業統計調査事務所，2005

63) 田中孝:新版農業動力学, 三点リンクヒッチ, 文永堂出版株式会社, 171-176, 1995

64) 安居院猛，中嶋正之：FFT の使い方，産報出版株式会社，39, 149-153，1982

65) 玉城勝彦，瀬川敬，澁谷幸憲，飯島渡：傾斜草地における広幅施肥作業に向けた履帯車両の自動走行制御技術（第 2 報），走行速度制御の向上，農機誌 68(3)，65-71，2006

66) 近藤文治：基礎制御工学，森北出版社，162-164，1980

67) Alcaraz, J.M., Yamashita, J., Sato, K.: Development of a trailer-mounted mechanical drawbar control system for a tractor-trailer combination operation in greenhouse, Journal of JSAM 70 (2), 80-89, 2008

68) 岡本嗣男：生物生産のための制御工学，朝倉書店，18-19，2003

69) 金子敏夫：JIS に基づく油圧回路図の見方・書き方（第 2 版）オーム社，108，1985